

**DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS
NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA
EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE
RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN**

**AUTOR:
FIDEL CLEMENTE QUELAL ECHEVERRÍA**

**DIRECTOR:
IVÁN PATRICIO MONTALVO GALÁRRAGA**

Quito, Julio 2019

Fidel Clemente Quelal Echeverría

DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Fidel Clemente Quelal Echeverría (Y'1991-M'06). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Salesiano Don Bosco de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de la determinación de rastreo del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos a partir de distintos niveles de radiación usando procesos de simulación. fquelal@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Iván Patricio Montalvo Galárraga (Y'1987-M'04). Se graduó de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en la Universidad San Francisco de Quito y de Master en Power Distribution en Newcastle University en 2016. Actualmente se encuentra trabajando como docente e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana. Área de interés: sistemas de puesta a tierra, generación distribuida, localización y optimización de fallas, Smart grids. imontalvo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2019 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Iván Patricio Montalvo Galárraga declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN*” realizado por Fidel Clemente Quelal Echeverría, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Julio de 2019

.....


Iván Patricio Montalvo Galárraga
C.C.: 1716480916

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Fidel Clemente Quelal Echeverría, con documento de identificación N° 1720721479, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: *“DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Julio de 2019



.....
Fidel Clemente Quelal Echeverría
C.C.: 1720721479

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.....	2
2. Sistemas solares PV	3
2.1. Aspectos técnicos del panel PV	4
2.2. El convertidor de potencia.....	4
2.2.1. Convertidor Elevador.....	5
2.2.2. Convertidor Reductor	5
2.2.3. Convertidores reductores elevadores.....	5
2.3. El Algoritmo MPPT	6
2.3.1. Perturbar y Observar (P&O)	6
2.3.2. Conductancia Incremental (InCon)	6
3. Modelamiento del panel PV	7
4. Implementación del MPPT	9
4.1. MPPT con el algoritmo P&O	10
4.2. MPPT con el algoritmo InCon.....	11
5. Análisis del caso y Resultados.....	12
6. Conclusiones.....	14
7. Trabajos futuros	14
8. Referencias	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un sistema PV que opera dentro del entorno humano sin causar impacto.....	2
Figura 2. Esquema general de los elementos que forman un sistema PV.....	4
Figura 3. Diagrama del circuito de un panel PV.....	7
Figura 4. a) Curva V-I a Distintas temperaturas y 1000W/m^2 . b) Curva V-P a distintas temperaturas y 1000W/m^2	7
Figura 5. Topología Boost utilizada en el modelamiento del convertidor de potencia.....	9
Figura 6. Datos de entrada de Radiación y temperatura en un intervalo de 12 horas de 6h00 a 18h00.	10
Figura 7. Diagrama de bloques del Algoritmo P&O.	11
Figura 8. Diagrama de bloques del Algoritmo InCon.	12
Figura 9. Potencia de salida del MPPT P&O en función del tiempo y la variación de radiación y temperatura.....	13
Figura 10. Potencia de salida del MPPT InCon en función del tiempo y la variación de radiación y temperatura.....	13

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos técnicos del panel JKM310-72 de Jinko Solar.....	9
Tabla 2. Parámetros de diseño convertidor boost.....	9
Tabla 3. Lógica de funcionamiento del algoritmo P&O.....	10
Tabla 4. Seudocódigo de funcionamiento del Sistema P&O en Simulink.....	11
Tabla 5. Seudocódigo de funcionamiento del Sistema InCon en Simulink.....	12
Tabla 6 Comparación de energía la generada por cada uno de los rastreadores P&O e InCon.....	14
Tabla 7. Matriz del estado del arte.....	18
Tabla 8. Resumen de indicadores del estado del Arte.	22
Tabla 9. Resumen para la formulación del problema.	22
Tabla 10. Solución para el análisis del problema.....	23

DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN

Resumen

El presente trabajo explica el funcionamiento de un rastreador de máxima potencia conectado a un arreglo de paneles solares fotovoltaicos y que mediante un algoritmo de control extrae la máxima potencia eléctrica del sistema fotovoltaico. Además, se ha analizado el comportamiento del modelo del panel fotovoltaico en operación con distintos métodos de rastreo, con la finalidad de evaluar la variable de potencia que puede entregar al sistema. Se hace una comparación de energía generada por el sistema PV con cada uno de los algoritmos para determinar cuál es el rastreador que mayor potencia puede extraer del sistema. La implementación del algoritmo del rastreador de máxima potencia se realiza con ayuda del Software Matlab y su Paquete de Simulación Simulink. Se utiliza el modelado de un panel PV acoplado a un convertidor que es controlado por el algoritmo de rastreo del punto de máxima potencia, y así finalmente comparar las características de las curvas potencia a distintas irradiaciones y temperaturas.

Palabras Clave: Extracción de energía, Rastreador de punto de máxima Potencia, convertidor de potencia, ciclo de trabajo

Abstract

The present work explains the operation of a maximum power tracker connected to an array of photovoltaic solar panels and that by means of a control algorithm extracts the maximum electrical power from the photovoltaic system. Also, the photovoltaic panel model behavior operation is studied with different tracking methods in order to evaluate the power variable that can be delivered. A comparison of energy generated by the PV system is made with each of the algorithms to determine what is the tracker that can extract the most power from the system. The maximum power tracker algorithm implementation is done with the help of Matlab Software and its Simulink Simulation Package. The modeling of a PV panel coupled to a converter that is controlled by the tracking algorithm of the maximum power point is used, and thus finally compare the characteristics of the power curves to different irradiations and temperatures.

Keywords: Maximum Power Point Tracking (MPPT), power converter, duty cycle

1. Introducción

En el campo de la generación eléctrica los sistemas fotovoltaicos (PV) ocupan un lugar muy importante debido al bajo impacto ambiental de operación y a la creciente evolución de la tecnología que incrementa su rendimiento [1][2][3]. A finales de la década de los 90 la producción de energía PV estaba a nivel de laboratorio ya que no podía competir contra la producción de energía fósil, además sus elevados costos y la complejidad de instalación limitaba a que solo personal técnico muy capacitado pueda manipularlos. En la actualidad, la reducción de costos y tiempo de manufactura, ha permitido que los elementos que conforman un sistema PV sean de fácil adquisición, lo que conlleva a una constante mejora del producto. China es el primer productor y desarrollador de tecnología PV tanto en paneles, inversores y acumuladores de energía [4][5][6] motivo de ello es que para el presente trabajo el panel de referencia es fabricado en dicho país. La miniaturización de la electrónica ha desarrollado convertidores de potencia más rápidos, compactos, livianos, y confiables, cuyas altas velocidades de conmutación hacen que sean adaptables a cualquier fuente de alimentación y que puedan abastecer cualquier tipo de carga eléctrica. El avance tecnológico en sistemas PV ha

permitido que existan centrales de generación eléctrica solar con capacidades de abastecimiento energético considerables, las cuales se interconectan a la red eléctrica convencional, permitiendo que los sistemas PV penetren en las áreas de producción energética, industrial y residencial [7]. Hoy en día la tecnología solar PV puede coexistir dentro del entorno del ser humano, debido a que no emite ruido, no emite movimiento o vibraciones como se puede ver en la Figura 1, su costo de operación es casi nulo; su impacto únicamente es visual, pero se contrarresta al combinarse con los techos de las construcciones residenciales e industriales [8][9], esto haría que en un futuro no muy lejano la civilización humana abastezca la demanda energética únicamente con la energía solar.

En la actualidad la humanidad se encuentra con la problemática de abastecer la creciente demanda energética [10][12] y a la vez no afectar negativamente al ya deteriorado ecosistema; por esta razón es que el desarrollo de la generación eléctrica PV es una de las áreas de desarrollo más importantes del sector energético debido al potencial declive de fuentes de energía no renovable [16]. Debido a que la tecnología de generación PV está en constante evolución; es necesario

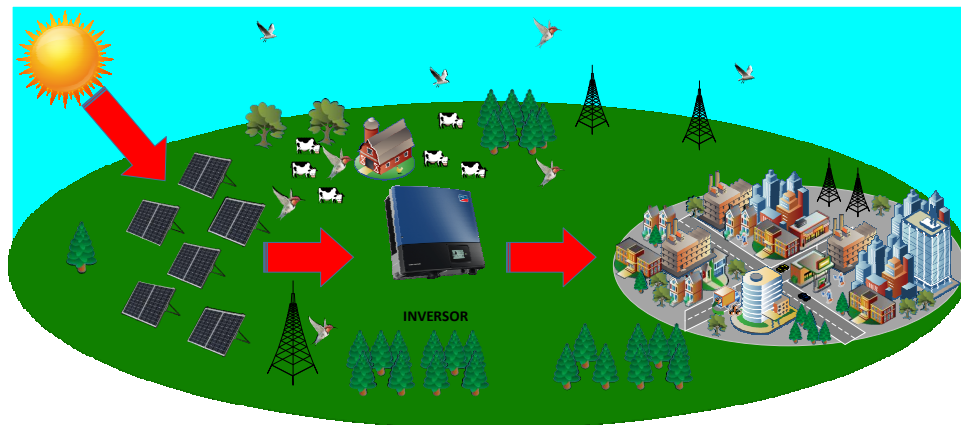


Figura 1. Representación de un sistema PV que opera dentro del entorno humano sin causar impacto.

mejorar y corregir [16] sus puntos débiles porque todavía hoy aún sigue siendo económicamente costosa respecto a otras fuentes de generación que tienen mayor impacto medio ambiental [17][18].

El Ecuador es un país que goza de radiación solar directa abundante, por lo tanto, un sistema solar PV que sea instalado en la geografía ecuatoriana requiere los sistemas PV relativamente básicos, a diferencia de otras regiones del planeta en donde los sistemas solares PV deben ser complementados con dispositivos de seguimiento para captar la mayor cantidad de radiación solar [19]; en [20] se hace un estudio comparativo entre dos algoritmos de rastreo de máxima potencia, pero se ejecutan las simulaciones con muestras pequeñas y se hace el estudio en el tiempo transitorio. El presente trabajo enfoca sus esfuerzos en hacer una comparación entre dos sistemas de control de rastreo de máxima potencia (MPPT) con una muestra de datos de radiación y temperatura que simula un ambiente real de trabajo. En el mercado existe una amplia gama de convertidores con distintas tecnologías que ofrecen distintas características de funcionamiento [21]. En [22] y [23] se ejecutan las simulaciones con modelos de convertidores demasiado complejos, el modelo de convertidor propuesto en este artículo es robusto y su sencillez permite acoplarse sin problemas a los sistemas de control de rastreo de máxima potencia. Los métodos de rastreo más populares serán evaluados en esta investigación tomado como base los modelos simulados con tiempos transitorios como se hizo en [1] y [24], posteriormente se desarrolla un sistema que pueda ejecutar la simulación en un tiempo continuo de 12 horas para determinar cuál algoritmo de rastreo de máxima potencia de los propuestos en esta investigación entrega más energía ante

distintos niveles de radiación y temperatura en un día con condiciones reales; así se lograría entregar una referencia técnica clara y precisa a consumidores y proveedores del tipo de equipo que deben adquirir para la implementación de un sistema PV.

2. Sistemas solares PV

Actualmente existen diversas tecnologías de paneles solares; los más comunes son los de silicio, que ofrecen eficiencias de hasta el 20% en sus diversas presentaciones moleculares como panel solar TSM-250PA05.08 del fabricante chino Trina Solar[5], construido con celdas de silicio multicristalino que entrega una potencia nominal de hasta 250Wp y que será parte importante de la presente investigación [6][25]. Otras nuevas tecnologías en sistemas PV son los paneles de multi-junturas con una estructura de capas dispuestas una debajo de otra, formando un tándem de placas solares [17]. Su principio de funcionamiento consiste en aprovechar la mayor cantidad de longitudes de onda del espectro electromagnético que irradia el sol; cada capa del panel es un filtro que absorbe la irradiación de una determinada longitud de onda, y que deja pasar la irradiación no absorbida a la capa inferior, cuyas características permiten que pueda absorberla. Se considera como pérdidas y se traduce en calor la radiación no absorbida por ninguna capa. Los rendimientos de los paneles PV multi-juntura son superiores a los paneles solares convencionales de silicio por la mayor cantidad de irradiación absorbida, donde los rendimientos alcanzan valores de hasta el 40% [1][26]; razón por la cual este tipo de tecnología solar PV tiene mayor aplicación en el sector aeroespacial por su alta eficiencia. Cada capa se forma por la combinación de elementos semiconductores n-p cuya brecha de energía característica

depende de los elementos combinados. La brecha de energía se refiere a la cantidad de irradiación solar que se requiere para producir electricidad. La combinación más frecuente de elementos en las capas multi-juntura es CIGS/GaAs (cobre, indio, galio y selenio / Galio, Arsénico) con valores que rondan los 1.42eV a 1.86eV . Los distintos valores de brecha de energía entre capa y capa hacen posible que el panel PV asimile irradiación de distintas longitudes de onda respectivamente [17][27]. La investigación y el desarrollo son indispensables para mejorar los paneles PV comerciales; esto reduce los costos de producción y se puede utilizar este tipo de tecnología multi capa en el sector residencial e industrial; haciendo que a largo plazo aumente de la cantidad de energía PV utilizada para abastecer el mercado energético, logrando así que se reduzcan las emisiones de gases producidos por la energías no renovables [28][29]. Esta investigación busca crear una herramienta de simulación que permita conocer la máxima potencia que entrega el modelo de un panel sin importar la tecnología con la que sea construido.

2.1. Aspectos técnicos del panel PV

Las características técnicas de todos los paneles solares PV comerciales están dadas en referencia a dos estándares prueba. El primer estándar es el STC (Standard test Condition), que consiste en poner a prueba al panel en condiciones ambientales ideales: Irradiación de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y temperatura 25°C ; que permiten determinar el valor de la I_{sc} [16][17]. El segundo estándar de experimentación de los paneles solares es el NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) con una irradiación de $800\text{W}/\text{m}^2$, y a una temperatura 20°C

que permite obtener el valor de V_{oc} [22][30][12]. Los estándares de prueba para paneles PV antes mencionados ayudan a la mejor obtención de las curvas I-V de cada panel PV, sin embargo, el diseño de un sistema solar PV práctico y funcional conlleva el análisis de muchas más variables ambientales, además de la irradiación y la temperatura. El ángulo de incidencia solar, la radiación solar, el albedo (radiación solar indirecta), la velocidad del viento, la densidad y temperatura del aire [31], incluso la polución y las sombras creadas por objetos cercanos [9], son otras variables a analizar para el diseño de un sistema de generación PV. A lo dicho anteriormente se suman los procesos de control de optimización para obtener la mayor cantidad de energía producida al menor costo posible, sin olvidar la confiabilidad [25].

2.2. El convertidor de potencia

A finales de la década de 1990, la electrónica de potencia ya había alcanzado progresos muy relevantes en lo que a convertidores de potencia se refiere [32][23], combinando los sistemas de control de lazo cerrado con la pujante tecnología computacional, hicieron de los convertidores dispositivos confiables y eficientes [11].

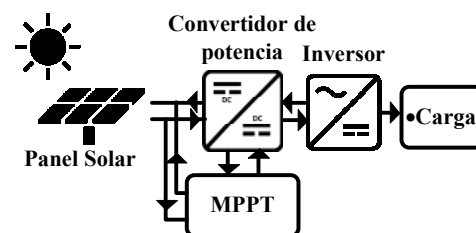


Figura 2. Esquema general de los elementos que forman un sistema PV.

El convertidor de potencia es una parte esencial de un sistema de generación eléctrica solar, porque es el equipo encargado de extraer la energía

de las celdas PV. Como se puede ver en la Figura 2, el convertidor de potencia en la primera etapa es DC/DC [33], cuya función es estabilizar el voltaje variante de entrada a un voltaje estable de servicio DC en el cual es opcional colocar una etapa de acumulación de energía como un banco de baterías [10][22][34]. La segunda etapa es un convertidor DC/AC cuya salida entrega un voltaje alterno a magnitud y frecuencia estándar que puede conectarse a la red eléctrica si es un sistema PV interconectado [9][32], o para el uso de aparatos eléctricos convencionales de uso doméstico, en caso de ser un sistema PV aislado [23]. En la práctica se encuentra comercialmente ambos sistemas convertidores embebidos en un solo equipo denominado inversor de voltaje. En esta investigación se estudia solamente el convertidor DC/DC que es controlado por el MPPT, y así determinar cuanta potencia total puede entregar a la carga. Todos los sistemas solares PV son diferentes unos de otros por el lugar en el que hayan sido manufacturados; por tanto, responden a distintos parámetros de diseño. Para elegir el convertidor de potencia que mejor se acople a un sistema de generación eléctrica PV hay que determinar la potencia solar total instalada, el voltaje de los paneles según el tipo de conexiones (serie o paralelo) y el voltaje de servicio DC que el dispositivo convertidor suministra para alimentar un sistema aislado con soporte de baterías o un sistema conectado a la red eléctrica. Otras características técnicas del dispositivo convertidor de potencia son el tipo de electrónica de potencia usada según los requerimientos del proceso para la regulación del voltaje de servicio DC, el manejo del ciclo de trabajo (duty cycle), y el algoritmo

usado en el MPPT. A continuación, se detallan los tipos de convertidores.

2.2.1. Convertidor Elevador

El convertidor Boost o elevador incrementa el voltaje de entrada V_c , se caracteriza por que generalmente se conecta un arreglo de paneles PV con voltaje V_c inferior al del voltaje de servicio V_{DC} ; y su función es mantener estable la salida [33]. El duty cycle que usa un convertidor boost para incrementar el voltaje de servicio DC, es directamente proporcional al incremento de voltaje de la salida del convertidor es decir que a menor ciclo de trabajo menor voltaje de salida y a mayor ciclo de trabajo mayor voltaje de salida [1][13][32][35][36].

2.2.2. Convertidor Reductor

El convertidor buck o reductor se utiliza cuando el V_c de entrada es mayor al voltaje de servicio DC; la regulación se estabiliza realizando una reducción de voltaje. Este tipo de convertidor no opera si el $V_c < V_{DC}$ [33]. El ciclo de trabajo de este convertidor es proporcional al voltaje de salida sin superar el voltaje máximo de servicio V_{DC} .

2.2.3. Convertidores reductores elevadores

El convertidor buck-boost es capaz de regular el voltaje de servicio V_{DC} sin importar si el voltaje de entrada V_c es mayor o menor que la referencia de servicio V_{DC} . El valor promedio del voltaje de salida del convertidor buck-boost depende del ciclo de trabajo del elemento interruptor. Los elementos que conforman este convertidor son un inductor y un capacitor que deben ser de características robustas porque el tipo de accionamiento del switch hace que se generen rampas altas de corriente [16][29][23][24].

2.3. El Algoritmo MPPT

El rastreador de máxima potencia o mejor conocido como MPPT por sus siglas en inglés, es un algoritmo de control que dirige el funcionamiento del convertidor de potencia para poder extraer la mayor cantidad de potencia del sistema PV. El MPPT es una herramienta importante para la generación eléctrica solar y eólica, debido a su funcionamiento, permite extraer la máxima potencia de la radiación solar y el viento respectivamente. El algoritmo MPPT se encuentra embebido en el convertidor de potencia y en la práctica todo dentro del conjunto inversor de voltaje. Existen varios tipos de métodos, entre ellos se encuentra el de perturbar y observar (P&O) y el de conductancia incremental (InCon), los cuales serán objeto de estudio en esta investigación. Existen métodos de rastreo mucho más eficientes, como por ejemplo los que se basan en redes neuronales y lógica difusa tal como se ve en [26], que puede llegar a incrementar la cantidad de energía obtenida en un 11.28% respecto a los algoritmos convencionales [1][13][26].

Siempre es necesario comparar cada una de las metodologías, para determinar los beneficios energéticos que aporta cada una de ellas. El algoritmo MPPT basa su funcionamiento en extraer la máxima potencia del sistema PV ante las perturbaciones de la red y las variaciones medioambientales [8][31][23][37][20].

Las comparaciones entre algoritmos de rastreo de Máxima potencia se hacen frecuentemente en simulaciones para poner a prueba cada uno de sus pseudocódigos y así observar el comportamiento de cada uno de ellos en función del tiempo de convergencia con respecto a las variaciones externas [10][18][21]. El MPPT puede trabajar de distintas formas dependiendo del

algoritmo de control que éste tenga; es así como en el presente trabajo mediante el software de ingeniería Matlab se explica el funcionamiento matemático de los algoritmos de control del MPPT para un arreglo de paneles PV. En la siguiente sección se toma el modelo de un panel fotovoltaico existente en el mercado [2]; posteriormente se analizan las curvas de voltaje y corriente en la sección 2 para así implementar el MPPT y se analizar el comportamiento de la potencia del panel. Los algoritmos que se estudian en el presente documento se detallan a continuación.

2.3.1. Perturbar y Observar (P&O)

El MPPT que se implementará en el sistema PV, toma la relación potencia-perturbación para hacer la regulación del ciclo de trabajo del convertidor de potencia. El algoritmo de rastreo de máxima potencia se llama P&O, por su nombre en inglés, *Perturb and Observe*. Consiste en perturbar el voltaje de la celda para que la salida de potencia sea siempre la máxima. El Método de perturbar y observar es muy efectivo, y en cuestión de costos, asequible, debido a que la inversión tecnológica es baja [21]. En el modelo de panel PV, se agrega como un subsistema externo el MPPT con el algoritmo de P&O como se puede ver en la Figura 2.

2.3.2. Conductancia Incremental (InCon)

El algoritmo de rastreo de máxima potencia de conductancia incremental llamado InCon por su nombre en inglés (*incremental conductance*), basa su funcionamiento en el monitoreo de las variables de I_c y V_c y sus respectivas variaciones en el tiempo, La condición para poder llegar a situar la salida a máxima potencia es usar el principio de

pendiente cero usando la función $\tan \frac{dI}{dV}$ [16][20][36].

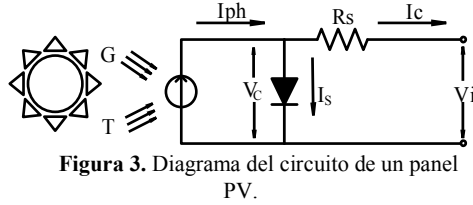


Figura 3. Diagrama del circuito de un panel PV.

3. Modelamiento del panel PV

El modelamiento matemático del panel se basa en el circuito equivalente de la celda solar de la Figura 3, la cual está en configuración exponencial simple, es decir, que tiene un solo diodo rectificador. El circuito posee una fuente de corriente en paralelo a un diodo semiconductor en paralelo, todo esto en serie a una resistencia serie (R_s).

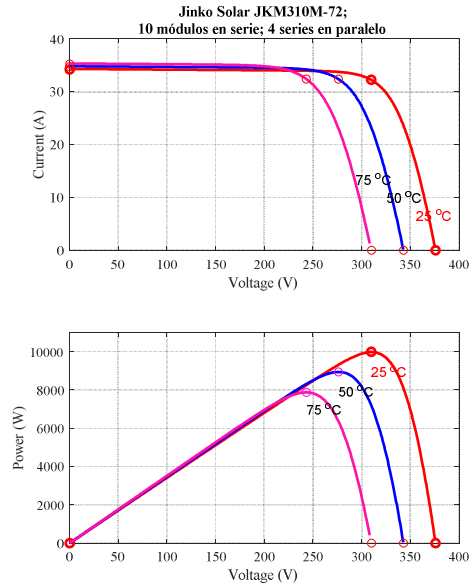


Figura 4. a) Curva V-I a Distintas temperaturas y 1000W/m^2 . b) Curva V-P a distintas temperaturas y 1000W/m^2 .

Los paneles PV se construyen con materiales semiconductores, lo que justifica la característica no lineal de la curva I-V del panel PV [12][38]; véase la Figura 4. El modelamiento matemático en conjunto con el software computacional ayuda a

evaluar el posible comportamiento del panel PV y del convertidor de potencia haciendo posible reducir los costos de desarrollo de nuevas tecnologías al mismo tiempo que minimiza el número de prototipos fallidos y permitiendo a los fabricantes entregar un producto con mayor calidad [34]. Para el modelamiento es necesario conocer la configuración del panel debido a que existen muchas más configuraciones del circuito equivalente de una celda, dependiendo del material de construcción del semiconductor. El modelamiento matemático panel PV es representado por las siguientes ecuaciones.

$$V_c = V_i + (I_c * R_s) \quad (1)$$

$$I_c = I_{ph} - I_s * \left(e^{\left(q * \frac{V_c + (I_c * R_s)}{n * k * T_c} \right)} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I_{ph} = \left[I_{sc} * (1 + K_{TI} * (T_c - T_{ref})) \right] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (3)$$

$$I_s = I_{s0} * \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} * e^{\left(\frac{-q * V_g}{n * k} * \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)} \quad (4)$$

$$I_{s0} = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\left(\frac{q * V_{oc}}{n * k * T_{ref}} \right)} - 1 \right)} \quad (5)$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{1}{X_V} \quad (6)$$

$$X_V = \frac{I_{s0} * q}{n * k * T_{ref}} * e^{\left(\frac{q * V_{oc}}{n * k * T_{ref}} \right)} \quad (7)$$

Donde:

V_c	Voltaje interno de la celda.
V_i	Voltaje en terminales de la celda.
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto.
I_c	Corriente generada por la celda.
R_s	Resistencia serie de la celda.
I_{sc}	Corriente de corto circuito de la celda.
I_{ph}	Corriente lumínica (photo Current).
I_s	Corriente de saturación del diodo.
I_{s0}	Corriente reversa de saturación del diodo.
T_{ref}	Temperatura de referencia STC.
T_c	Temperatura de trabajo de la celda.
K_{TI}	Coeficiente térmico de corriente de corto circuito.
G	Irradiación de trabajo aplicada a la celda en W/m^2 .
G_{ref}	Irradiación referencial aplicada a la celda a STC.
n	Coeficiente de idealidad del diodo
V_g	Voltaje de banda [eV] del elemento semiconductor
q	Carga eléctrica de un electrón.
k	Constante de Boltzman.

Tal como se detalla en las anteriores ecuaciones [3][39], un panel PV consta de muchas variables que pueden ser manipuladas; aunque los parámetros más importantes que influyen notablemente en el comportamiento eléctrico de este panel son cuatro variables fundamentales: R_s , I_s , I_{s0} , I_{ph} [38]. Cada celda cuenta con dos terminales que se encuentran conectados entre sí en un arreglo de celdas en serie de acuerdo a la configuración de voltaje del panel, por lo tanto, la ecuación (1) demuestra que el voltaje entre los terminales de la celda solar es menor al voltaje interno

de la celda, principalmente debido a las pérdidas de voltaje en la resistencia serie del modelo [5][26][32].

La ecuación (2), es una función exponencial compuesta, cuya incógnita es I_c , que solo se puede solucionar con métodos iterativos. I_c es la corriente total que entrega el panel, formulada de acuerdo a la teoría de semiconductores de Shockley, que se compone de la corriente generada por la irradiación aplicada a la celda en la ecuación (3), menos la corriente de saturación del diodo semiconductor en la ecuación (4), multiplicada por el factor exponencial del comportamiento de los semiconductores [21][23][40][41].

La corriente de saturación del diodo rectificador está expresada en la ecuación (4), y la ecuación (5) está implícita en ella; aquí se puede notar nuevamente la teoría de semiconductores por naturaleza exponencial de la función [12][13][38]. Finalmente, la ecuación (6) permite obtener el valor para la resistencia serie de la celda, tomando en cuenta que el valor de la variación del voltaje con respecto a la intensidad (dV/dI) se la obtiene por medio de métodos experimentales [6][7][8][36]. El paquete de simulación gráfica Simulink de Matlab modela las ecuaciones explicadas en la sección anterior mediante un bloque PV alojado en la librería del software de simulación. Matlab utiliza toda la información técnica detallada del fabricante del panel, como se puede ver en la Tabla 1 para crear un bloque aplicable para la simulación de un sistema PV [17][33].

El bloque del panel PV que se encuentra en el entorno de Matlab es configurable para usarse con otros modelos de panel PV. El bloque PV del entorno de Simulink está configurado en un arreglo de 40 Paneles PV; configurado en 4 series de 10 módulos en paralelo, lo que forma un sistema solar PV de 10kW de potencia

instalada. Se realizan ensayos de funcionamiento a distintas temperaturas con un nivel de radiación constante de $1000W/m^2$, cuyas gráficas de corriente y potencia se muestran en la Figura 4. En el punto de máxima potencia a $25^\circ C$ el sistema entrega un voltaje de 380VDC, mientras que para altas temperaturas el voltaje de operación de máxima potencia se reduce a 280VDC. De esta manera se comprueba que el voltaje de operación del sistema PV influye inversamente con V_c . También se visualiza la potencia a distintas temperaturas; el voltaje de máxima potencia es de 380VDC a temperatura de $25^\circ C$ y 280VDC a temperatura de $75^\circ C$. Además, el pico de potencia se ve afectado ya que a $25^\circ C$ la potencia alcanza los 12kW mientras que para $75^\circ C$ el Panel PV entrega 9.5kW. Por lo tanto, la temperatura afecta inversamente a la potencia.

Tabla 1. Datos técnicos del panel JKM310-72 de Jinko Solar.

Datos Técnicos JKM310-72	
Potencia Máxima (Pmax)	250W
Voltaje a Pmax (Vmp)	30.3V
Corriente a Pmax (Imp)	8.27A
Corriente de corto circuito (Isc)	8.85A
Voltaje de Circuito Abierto (Voc)	37.6V
Coeficiente de temperatura De Corriente (Kti)	0.047%/°C
STC	25°C a 1000W/m ²

4. Implementación del MPPT

Con el modelo del panel PV configurado, se procede a acoplar el convertidor de potencia que será controlado por el MPPT.

Como se puede ver en la Figura 5 se usará la configuración Boost la cual se encarga de elevar el voltaje de entrada

(V_i) a la salida del convertidor (V_o). El valor del ciclo de trabajo (D) del convertidor está dado por la ecuación(8) [42].

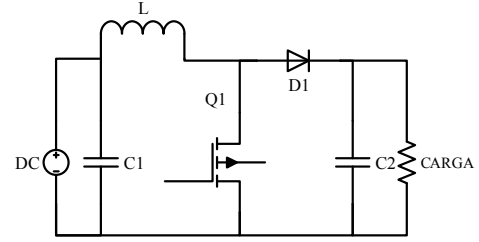


Figura 5. Topología Boost utilizada en el modelamiento del convertidor de potencia.

$$V_o = V_i * \frac{1}{1 - D} \quad (8)$$

$$L_{min} = \frac{D * R * (1 - D)^2}{2 * f_{sw}} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R * C * f_{sw}} \quad (10)$$

El dimensionamiento del convertidor obedece a las ecuaciones (9) y (10) las cuales establecen los valores del inductor y del filtro de rizado de la salida del convertidor.

Tabla 2. Parámetros de diseño convertidor boost.

Parámetros de diseño Convertidor Boost.	
Frec. de conmutación [f_{sw}]	5kHz
Inductor [L]	50μH
Capacitor de Rizado [C]	2000μF

En la Tabla 2, se encuentran resumidos los parámetros de diseño del convertidor que se utilizará en la simulación. En este trabajo se utiliza datos de una estación meteorológica existente en el campus sur de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. El equipo meteorológico ayuda a la obtención de los datos de entrada para la simulación del modelo. Las magnitudes que se utilizan para la

simulación son: fecha, temperatura y radiación global. Para esta investigación se realizan únicamente las simulaciones tomando en cuenta irradiación y temperatura que se aplica al panel. Los datos suministrados poseen un muestreo de 10 minutos durante las 24 horas del día. Para el presente artículo se ha establecido un intervalo de datos válidos de las horas con probabilidad alta de radiación solar, comprendidos entre las 06h00 hasta las 18h00. Se implementarán en el sistema 12 horas de datos de radiación y temperatura de esta manera se puede importar los datos de temperatura y radiación desde la herramienta *Signal Builder* del Software de Simulación *Simulink*.

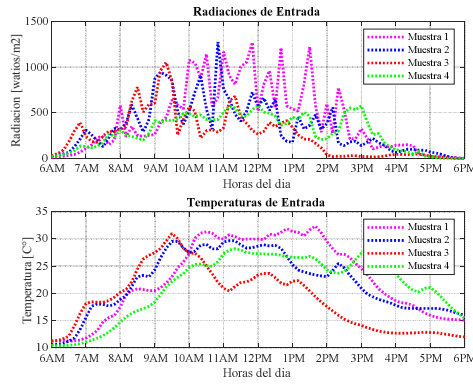


Figura 6. Datos de entrada de Radiación y temperatura en un intervalo de 12 horas de 6h00 a 18h00.

En la Figura 6, se puede visualizar de forma gráfica las magnitudes de radiación y temperatura que serán aplicadas al modelo del panel con el rastreador de máxima potencia, la radiación es una magnitud muy sensible a los cambios, se observa un comportamiento irregular con máximos y mínimos muy pronunciados, por otra parte las muestras de temperatura muestran un perfil menos irregular y más continuo. La muestra 1 tiene los mayores niveles de radiación solar, con un pico máximo de $1269W/m^2$ a las 11h30 de la mañana y una temperatura máxima de

$32^{\circ}C$ a las 13h45. La muestra 4 con los valores más bajos de radiación con un pico máximo de $597W/m^2$ a las 15h00 de la tarde y una temperatura con un máximo $28^{\circ}C$ a las 15h30. Hay que mencionar que la radiación y la temperatura son magnitudes que varían independientemente una de otra.

4.1. MPPT con el algoritmo P&O

El algoritmo de rastreo P&O basa su funcionamiento en la medición del V_c y la I_c para extraer máxima potencia del panel PV por medio de las perturbaciones que el controlador de potencia aplica al sistema. En la Tabla 3, se detallan cada una de las instrucciones lógicas que va a realizar el subsistema P&O dentro del sistema de control del convertidor de potencia; estas instrucciones serán las encargadas de hacer que el modelo del panel entregue la mayor potencia posible.

Tabla 3. Lógica de funcionamiento del algoritmo P&O.

Perturbación	Cambio en la Potencia	Siguiente Perturbación
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Haciendo una comparativa de los estados de las perturbaciones con la lógica booleana, se puede asemejar el comportamiento del incremento o disminución de las perturbaciones con la tabla de verdad de la función lógica XNOR, es por ello que para la implementación del algoritmo de control P&O se utiliza la función lógica antes mencionada, ver la Figura 7.

La condición válida para que exista un incremento de potencia de salida se da cuando los estados lógicos de la perturbación y variación de potencia son iguales. El caso contrario es si los

estados lógicos previos de la perturbación y el cambio de potencia son diferentes, entonces la potencia de salida se reduce, para entender esto ver Tabla 3.

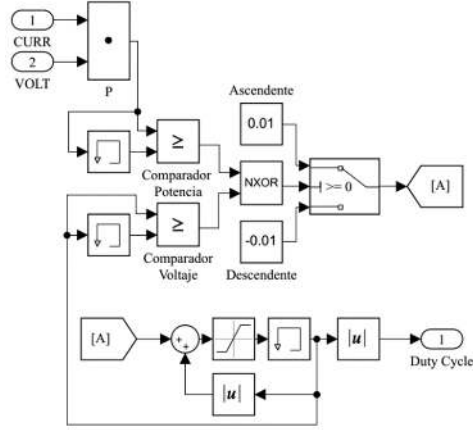


Figura 7. Diagrama de bloques del Algoritmo P&O.

Entonces el subsistema P&O incrementa o disminuye en 0.01 unidades el duty cycle para el control del elemento interruptor del convertidor en cada paso de simulación, dependiendo del tipo de perturbación que arroje la salida del algoritmo de control. De esta manera el MPPT con algoritmo P&O se encarga de extraer la máxima potencia del sistema PV [17] La mayor ventaja de este rastreador es que no necesita saber las características eléctricas del sistema PV, sino que va analizando la potencia de salida en el tiempo de muestreo. El MPPT con algoritmo P&O propuesto en este trabajo es un sistema de control de ciclo cerrado ya que el duty cycle de salida se retroalimenta para ejecutar la lógica de control como se puede ver a continuación el pseudocódigo.

4.2. MPPT con el algoritmo InCon

El algoritmo InCon propuesto en esta investigación, posee un sistema de control de lazo abierto debido a que la salida de control del duty cycle no se retroalimenta. El algoritmo InCon

monitorea los parámetros de V_c y I_c para extraer máxima potencia del panel PV. Su lógica de funcionamiento es más compleja y requiere muchas más funciones lógicas como se puede ver en la Figura 8.

Tabla 4. Seudocódigo de funcionamiento del Sistema P&O en Simulink.

Seudocódigo Sistema P&O.
Paso 1: Inicio $n = 0$ $n = n + 1$
Paso 2: Leer: V_c, I_c y D_{cycle_n} . $V_n = V_c \wedge I_n = I_c$ $P_n = V_n * I_n$ $P_{n-1} = 0$ $D_{cycle_{n-1}} = 0$
Paso 3: Si: $P_n > P_{n-1} \wedge D_{cycle_n} > D_{cycle_{n-1}}$ Entonces: Escribir: $D_{cycle_{n+1}} = D_{cycle_n} + \Delta D_{cycle}$ Fin Si.
Paso 4: Si: $P_n < P_{n-1} \wedge D_{cycle_n} > D_{cycle_{n-1}}$ Entonces: Escribir: $D_{cycle_{n+1}} = D_{cycle_n} - \Delta D_{cycle}$ Fin Si
Paso 5: Si: $P_n > P_{n-1} \wedge D_{cycle_n} < D_{cycle_{n-1}}$ Entonces: Escribir: $D_{cycle_{n+1}} = D_{cycle_n} - \Delta D_{cycle}$ Fin Si.
Paso 6: Si: $P_n < P_{n-1} \wedge D_{cycle_n} < D_{cycle_{n-1}}$ Entonces: Escribir: $D_{cycle_{n+1}} = D_{cycle_n} + \Delta D_{cycle}$ Fin Si.
Paso 5: Ir a Inicio

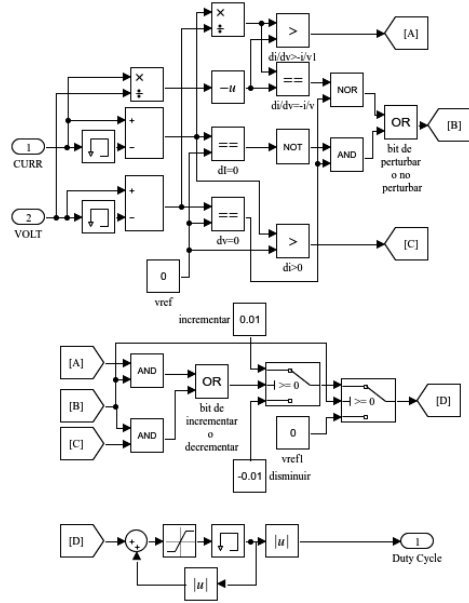


Figura 8. Diagrama de bloques del Algoritmo InCon.

El MPPT con el algoritmo InCon tiene instrucciones de proceso anidadas, lo cual hace necesario escribir muchas más líneas de código respecto al algoritmo MPPT con P&O. El método propuesto en esta investigación utiliza la lógica booleana para la construcción del algoritmo de control. Se hacen tres comparaciones anidadas con los parámetros de entrada V_c y I_c , la primera comparación determina si se está entregando la máxima potencia, la segunda comprobación determina si hay que incrementar el duty cycle, finalmente el caso contrario determina si hay que disminuir el duty cycle. A continuación, se presenta el pseudocódigo del Algoritmo InCon.

5. Análisis del caso y Resultados

Las simulaciones se ejecutan con los algoritmos, anteriormente definidos, implementados en el convertidor de potencia que se encuentra conectado al sistema PV. Todas la simulaciones se ejecutan con las mismas muestras de radiación y temperatura, que se muestran en la Figura 6, tanto para el

algoritmo P&O y el InCon. Las simulaciones con cada algoritmo de rastreo se ejecutan de tal forma que no modifiquen las configuraciones y parámetros de entrada del sistema, de tal forma que los resultados que arroje el software de simulación se encuentre en igualdad de tiempo de muestreo, cantidad de datos de entrada y parámetros de simulación.

Tabla 5. Pseudocódigo de funcionamiento del Sistema InCon en Simulink.

Pseudocódigo sistema InCon.
Paso1: Inicio $n = 0$ $n = n + 1$
Paso 2: Leer: V_c y I_c . $V_n = V_c \wedge I_n = I_c$ $\Delta V = V_n - V_{n-1}$ $\Delta I = I_n - I_{n-1}$
Paso 3: Si: $\Delta V = 0$ Entonces Si: $\Delta I = 0$ Entonces Ir a Inicio. Caso Contrario Si: $\Delta I > 0$ Entonces $D_{cycle} = D_{cycle} + \Delta D_{cycle}$ Caso contrario: $D_{cycle} = D_{cycle} - \Delta D_{cycle}$ Fin Si Fin Si Caso contrario Si: $dI/dV = -dI/dV$ Entonces Ir a Inicio. Caso Contrario Si: $dI/dV > -dI/dV$ Entonces $D_{cycle} = D_{cycle} + \Delta D_{cycle}$ Caso contrario: $D_{cycle} = D_{cycle} - \Delta D_{cycle}$ Fin Si Fin Si Fin Si
Paso 4 Ir a Inicio

En la Figura 9 se aprecia cómo el MPPT con el algoritmo P&O a lo largo de las 12 horas de radiación y en cada

uno de las muestras ha logrado obtener la máxima potencia posible.

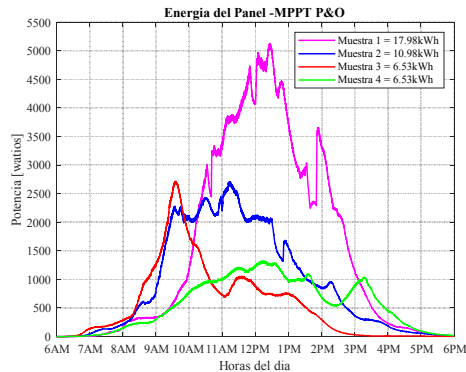


Figura 9. Potencia de salida del MPPT P&O en función del tiempo y la variación de radiación y temperatura.

Los mayores niveles de radiación se presentan en la muestra 1. El convertidor con MPPT P&O extrae de la muestra 1 un total de 17.98kWh con un pico de 5kW; en la hora de mayor radiación solar. Los niveles de radiación más bajos se entregan en la muestra 4 con los que el convertidor con MPPT P&O extrae 6.53kWh con un pico de máxima potencia de 1.4kW en la hora de mayor radiación. El tiempo de respuesta frente a los cambios ambientales del algoritmo P&O es más preciso, por la cantidad reducida de instrucciones de proceso, se puede ver en la Figura 9 como el perfil de la curva con MPPT P&O extrae de potencia es similar al trazo de la radiación de entrada de la Figura 6. Para obtener la energía total en cada día se aplica la teoría de área bajo la curva.

En la Figura 10 se nota como el algoritmo InCon ha logrado extraer la máxima potencia del sistema PV propuesto, las simulaciones se han ejecutado con datos de entrada idénticos a los utilizados para el algoritmo P&O. La muestra 1 cuyos niveles de radiación fueron los mayores de todos los datos de entrada, el convertidor obtuvo picos de potencia de 4kW y al final del día generó 15.63kWh. La muestra 4 con menor

radiación presentó un pico máximo de potencia de 1kW y al final del día generó 5.83kWh

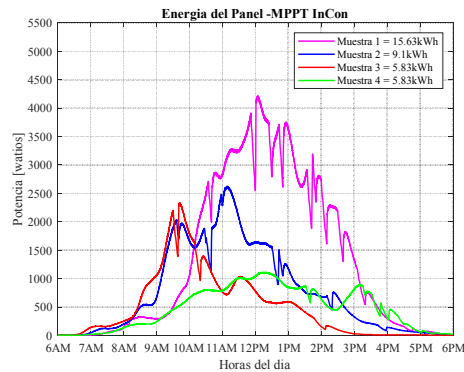


Figura 10. Potencia de salida del MPPT InCon en función del tiempo y la variación de radiación y temperatura.

Haciendo una comparación de la curva de potencia extraída con el perfil de entrada de la radiación de la Figura 6, se observa mucha diferencia de la una con la otra. El algoritmo InCon en su perfil de potencia de salida presenta rampas descendentes de potencia con una duración no mayor a 10 minutos que son reflejo del tiempo de retardo de ejecución de las instrucciones anidadas. Los descensos de potencia son suprimidos en un tiempo de recuperación que la lógica de control del algoritmo InCon se encarga de reducir. En las iteraciones siguientes a la disminución de potencia la lógica de control realiza la extracción de la máxima potencia posible, sin embargo, este comportamiento del algoritmo InCon frente a las perturbaciones externas hace que la energía final obtenida del sistema PV sea menor respecto a la obtenida por el convertidor con algoritmo P&O, en la Tabla 6 se explica los valores obtenidos después de la simulación. Existe una diferencia de 5kW a pesar de que los dos algoritmos fueron puestos a prueba con los mismos parámetros de simulación.

Tabla 6 Comparación de energía la generada por cada uno de los rastreadores P&O e InCon.

	P&O		InCon	
	Pmax [kW]	Energía [kWh]	Pmax [kW]	Energía [kWh]
Muestra 1	5.12	17.98	4.2	15.63
Muestra 2	2.7	10.98	2.62	9.1
Muestra 3	2.71	6.53	2.33	5.83
Muestra 4	1.32	6.53	1.11	5.83
Total [kWh]	42.02		36.39	

6. Conclusiones

Después de ejecutar las simulaciones y comparar los resultados; el algoritmo P&O ha presentado mejores resultados en lo que se refiere a extracción de potencia. La implementación de los algoritmos MPPT en forma de lógica booleana, ha simplificado su entendimiento y nivel de procesamiento, las 4 instrucciones y el lazo cerrado de control de P&O lograron obtener un mejor rendimiento en extracción de potencia frente a las 5 instrucciones de InCon con un control de lazo abierto. Se puede determinar que P&O fue más eficiente frente a InCon por la menor cantidad de instrucciones que debe ejecutar, por la mayor cantidad de energía perdida producida.

El intervalo óptimo en el cual el convertidor extrae la mayor potencia del panel, está dado entre 0 y 0.25 de duty cycle, para valores superiores a 0.25 el convertidor entra en un estado de no conversión de potencia, además que el algoritmo de MPPT P&O no pudo encontrar la máxima potencia por que los parámetros no obedecen a las condiciones de rastreo establecidas, por lo tanto se hizo necesario colocar un limitador que evitó que el duty cycle tome valores que provoque en mal funcionamiento del MPPT.

El algoritmo InCon mostró inconvenientes de funcionamiento frente a las perturbaciones externas y el tiempo de recuperación, los descensos de potencia provocaron que se obtenga menos energía de la esperada, además, las simulaciones se realizaron en intervalos de tiempo inferiormente proporcionales al tiempo real de toma de las muestras; lo cual indica claramente la eficiencia del algoritmo P&O frente al InCon. Se puede determinar que P&O tiene excelente respuesta ante pequeños periodos de simulación debido a sus 4 instrucciones de procesamiento, por lo tanto, se recomienda la implementación de un MPPT con P&O a un sistema PV por sus mejores características de extracción de potencia.

7. Trabajos futuros

En el presente trabajo se han realizado las simulaciones del sistema propuesto conectado a una carga estática, para futuros trabajos se propone implementar una carga dinámica, con características de demanda del sector residencial e industrial para analizar el comportamiento de la salida frente a las fluctuaciones externas, también se propone implementar un sistema controlador de carga de baterías para mitigar las fluctuaciones de potencia y analizar cuanta más carga puede abastecer el sistema PV.

8. Referencias

- [1] R. Blange, C. Mahanta, and A. K. Gogoi, "MPPT of solar photovoltaic cell using perturb & observe and fuzzy logic controller algorithm for buck-boost DC-DC converter," *2015 Int. Conf. Energy, Power Environ. Towar. Sustain. Growth, ICEPE 2015*, pp. 1–5, 2016.
- [2] W. Reith, "Physical basics," in *Diagnostic and Interventional*

- Radiology*, Wiley, 2016, pp. 3–10.
- [3] “Teoría del efecto fotoeléctrico de Einstein.” [Online]. Available: <https://www.nucleares.unam.mx/~vieyra/node11.html>. [Accessed: 30-May-2019].
 - [4] “10 Top Solar Panel Companies & Manufacturers for 2019 | EnergySage.” [Online]. Available: <https://news.energysage.com/best-solar-panel-manufacturers-usa/>. [Accessed: 30-May-2019].
 - [5] Trina Solar, “Tsm-pa05.08.”
 - [6] J. Solar, “JKM310M-72,” 2008.
 - [7] X. He, X. Zhang, H. Liu, and H. Zhang, “Application of an integrated transformerless buck-boost converter in photovoltaic MPPT systems,” *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 2015-Augus, no. June, pp. 692–695, 2015.
 - [8] J. A. Ramos-Hernanz, J. M. Lopez-Guede, E. Zulueta-Guerrero, N. Bizon, F. Oterino-Echavarri, and A. Larrea, “Study of the behavior of the Incremental Conductance algorithm for MPPT,” *Proc. 8th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2016*, pp. 1–6, 2017.
 - [9] K. Irisawa, T. Saito, I. Takano, and Y. Sawada, “Maximum power point tracking control of photovoltaic generation system under non-uniform insolation by means of monitoring cells,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2000-Janua, pp. 1707–1710, 2000.
 - [10] B. Jeon, K.-H. Kim, K. Lee, J.-H. Im, G.-B. Cho, and Y.-O. Choi, “Battery Controller Design of Stand-alone Photovoltaic System Using IncCond Method,” in *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2012, pp. 1–5.
 - [11] J. A. Gow and C. D. Manning, “Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies,” *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 146, no. 2, p. 193, 1999.
 - [12] I. Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK,” 2008.
 - [13] N. A. Rahim, A. Che Soh, M. A. M. Radzi, and M. A. A. M. Zainuri, “Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc-dc converter,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 2, pp. 183–194, 2014.
 - [14] W. Zhan, A. E. Goulart, M. Falahi, and P. Rondla, “Development of a low-cost self-diagnostic module for oil-immersed forced-air cooling transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 129–137, 2015.
 - [15] A. A. Chowdhury, S. Member, and D. O. Koval, “Development of Probabilistic Models for Computing Optimal Distribution Substation Spare Transformers,” *Finance*, vol. 41, no. 6, pp. 1493–1498, 2005.
 - [16] P. Vineeth and K. Manjunath, “Analysis, Design and Implementation for Control of Non-Inverted Zeta Converter using Incremental conductance MPPT Algorithm for SPV Applications,” pp. 4–8, 2017.
 - [17] N. Das, H. Wongsodihardjo, and S. Islam, “Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 917–924, 2015.

- [18] G. Yang, "A new analytical method for the extraction of series resistance of solar cell," no. Icmc, pp. 254–257, 2014.
- [19] S. S. Valunekar, S. D. Joshi, and N. R. Kulkarni, "Implementation of maximum power point tracking charge controller for renewable energy," *Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Adv. Commun. Control Comput. Technol. ICACCCT 2014*, no. 978, pp. 255–259, 2015.
- [20] I. V. Banu, R. Beniuga, and M. Istrate, "Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods," *2013 - 8th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2013*, no. 1, pp. 23–26, 2013.
- [21] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [22] H. Wang, L. Vinayagam, H. Jiang, Z. Q. Cai, and H. Li, "New MPPT solar generation implemented with constant-voltage constant-current DC/DC converter," *Proc. - 2016 51st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2016*, vol. 2017-Janua, no. 2, pp. 1–6, 2017.
- [23] Soedibyo, B. Amri, and M. Ashari, "The comparative study of Buck-boost, Cuk, Sepic and Zeta converters for maximum power point tracking photovoltaic using P&O method," *ICITACEE 2015 - 2nd Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Strength. Inf. Technol. Electr. Comput. Eng. Implementation, Proc.*, pp. 327–332, 2016.
- [24] R. Arulmurugan and N. S. Vanitha, "Numerical analysis of incremental conductance with cyclic measurement of the mppt algorithm for pv power generation," *IET Chennai Fourth Int. Conf. Sustain. Energy Intell. Syst. (SEISCON 2013)*, pp. 78–84, 2013.
- [25] D. L. King, "Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions," in *AIP Conference Proceedings*, 1997, vol. 394, no. 1, pp. 347–368.
- [26] H. Rezk and E.-S. Hasaneen, "A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems," 2015.
- [27] J. A. Ramos Hernanz, J. J. Campayo Martín, I. Zamora Belver, J. Larrañaga Lesaka, E. Zulueta Guerrero, and E. Puelles Pérez, "Modelling of Photovoltaic Module," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 08, pp. 1186–1190, 2010.
- [28] T. Latif and S. R. Hussain, "Design of a charge controller based on SEPIC and buck topology using modified Incremental Conductance MPPT," *8th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. Adv. Technol. a Better Tomorrow, ICECE 2014*, no. 1, pp. 824–827, 2015.
- [29] D. K. Chy and M. Khaliluzzaman, "Experimental assessment of PV arrays connected to Buck-Boost converter using MPPT and Non-MPPT technique by implementing in real time hardware," *Proc. 2015 3rd Int. Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2015*, pp. 306–309, 2016.
- [30] SOLAREX, "MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules," no. 301, pp. 347–368, 1997.
- [31] S. René Torrez, *Irradianza Solar*

- y *Temperatura Del Aire Superficial en una Atmosfera Estática*, vol. 14, no. 14. Soc, 2008.
- [32] M. Orellana, S. Petibon, B. Estibals, and C. Alonso, "Four Switch Buck-Boost converter for Photovoltaic DC-DC power applications," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, no. 1, pp. 469–474, 2010.
 - [33] G. Walker, "Evaluating Mppt Converter Topologies Using a Matlab Pv Model," *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–56, 2001.
 - [34] J. Jana, K. Das Bhattacharya, and H. Saha, "Design & implementation of MPPT algorithm for battery charging with photovoltaic panel using FPGA," in *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, 2014, pp. 1–5.
 - [35] S. S. Mohammed and D. Devaraj, "Simulation of Incremental Conductance MPPT based two phase interleaved boost converter using MATLAB/Simulink," *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Technol. ICECCT 2015*, pp. 1–6, 2015.
 - [36] D. K. Sharma and G. Purohit, "Advanced perturbation and observation (P&O) based maximum power point tracking (MPPT) of a solar photo-voltaic system," *India Int. Conf. Power Electron. IICPE*, pp. 1–5, 2012.
 - [37] M. A. G. De Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. De Azevedo Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2013.
 - [38] S. S. Valunekar, S. D. Joshi, and N. R. Kulkarni, "Hardware and simulation study of MPPT charge controller for non-conventional energy sources," *2015 Int. Conf. Ind. Instrum. Control. ICIC 2015*, no. ICIC, pp. 529–534, 2015.
 - [39] B. Bora *et al.*, "Series Resistance Measurement of Solar PV Modules Using Mesh in Real Outdoor Condition," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 503–508, Dec. 2016.
 - [40] A. Singh, "MATLAB / SIMULINK Simulation of PV System based on MPPT in Variable Irradiance with EV Battery as Load," *2017 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Comput. Res.*, no. 2, pp. 4–7, 2017.
 - [41] M. A. De Blas, J. L. Torres, E. Prieto, and A. García, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices," *Renew. Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, 2002.
 - [42] L. A. D'Alessio, L. G. González, and R. O. Cáceres, "Diseño y construcción de un convertidor boost de pequeña potencia," *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 6, no. 2, pp. 2–7, 2014.

Tabla 7. Matriz del estado del arte.

DETERMINACIÓN DEL RASTREO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN USANDO PROCESOS DE SIMULACIÓN																								
	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIÓN OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ÍTEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	citas	modelamiento del panel	comparación de algoritmos	modelamiento del convertidor de potencia	modelamiento del algoritmo	cantidad de energía entregada	maximizar energía producida	minimización de pérdidas por el tiempo de convergencia	elección del mejor método de rastreo	elección del convertidor de potencia	complejidad de implementación	precisión de MPPT	rendimiento del convertidor	respuesta a cambios ambientales	sistemas micro controlados	sistemas computacionales	sistemas compuestos	Perturbar y observar	Conductancia Incremental	redes neuronales	Fuzy Control	Otros
1	2014	A new analytical method for the extraction of series resistance of solar cell	1	X					X															X
2	2015	A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems	32		X			X	X			X			X		X			X		X		
3	2012	Advanced perturbation and observation (P&O) based maximum power point tracking (MPPT) of a solar photo-voltaic system	26			X							X	X					X	X				
4	2017	Analysis, Design and Implementation for Control of Non-Inverted Zeta Converter using Incremental conductance MPPT Algorithm for SPV Applications	1				X					X	X		X	X		X						
5	2015	Application of an integrated transformer less buck-boost converter in photovoltaic MPPT systems	1			X			X			X			X		X							X
6	2012	Battery controller Design of Stand Photovoltaic System Using IncCond d Method	1		X	X			X		X		X		X		X				X			
7	2013	Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods	58	X	X				X		X			X				X		X	X			
8	2016	Comparative study of P&O and Modified Incremental Conductance algorithm in solar maximum power point tracking	2		X				X	X						X	X			X	X			

		DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIÓN OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	citas	modelamiento del panel	comparación de algoritmos	modelamiento del convertidor de potencia	modelamiento del algoritmo	cantidad de energía entregada	maximizar energía producida	minimización de pérdidas por el tiempo de convergencia	elección del mejor método de rastreo	elección del convertidor de potencia	complejidad de implementación	precisión de MPPT	rendimiento del convertidor	respuesta a cambios ambientales	sistemas micro controlados	sistemas computacionales	sistemas compuestos	Perturbar y observar	Conductancia Incremental	redes neuronales	Fuzy Control	Otros
9	2007	Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques	4733	X					X		X		X	X					X	X	X	X	X	X
10	2014	Design & implementation of MPPT algorithm for battery charging with photovoltaic panel using FPGA	2			X	X		X					X	X		X			X				
11	2015	Design of a charge controller based on SEPIC and buck topology using modified Incremental Conductance MPPT	8		X	X		X	X			X			X		X	X		X				
12	1999	Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies	1148	X		X			X			X				X			X					X
13	2014	Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc-dc converter	155		X	X	X			X	X	X	X				X	X	X	X			X	
14	2008	Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK	825	X																				
15	2001	Evaluating Mppt Converter Topologies Using a Matlab Pv Model	1020					X	X						X			X	X					
16	2013	Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications	855		X			X	X							X								
17	2016	Experimental assessment of PV arrays connected to Buck-Boost converter using MPPT and Non-MPPT technique by implementing in real time hardware	1		X	X		X	X	X	X					X	X	X		X				
18	2010	Four Switch Buck-Boost converter for Photovoltaic DC-DC power applications	29			X		X	X			X	X		X	X	X			X				
19	2015	Hardware and simulation study of MPPT charge controller for non-conventional energy sources	0	X	X	X	X	X	X		X							X			X			

ÍTEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIÓN OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	citas	modelamiento del panel	comparación de algoritmos	modelamiento del convertidor de potencia	modelamiento del algoritmo	cantidad de energía entregada	maximizar energía producida	minimización de pérdidas por el tiempo de convergencia	elección del mejor método de rastreo	elección del convertidor de potencia	complejidad de implementación	precisión de MPPT	rendimiento del convertidor	respuesta a cambios ambientales	sistemas micro controlados	sistemas computacionales	sistemas compuestos	Perturbar y observar	Conductancia Incremental	redes neuronales	Fuzi Control	Otros
20	2015	Implementation of maximum power point tracking charge controller for renewable energy	3	X		X		X																
21	2008	Irradianza Solar y Temperatura del Aire Superficial en una atmosfera Estática	2													X								
22	2017	MATLAB / SIMULINK Simulation of PV System based on MPPT in Variable Irradiance with EV Battery as Load	0		X	X	X		X							X		X		X				
23	2000	Maximum power point tracking control of photovoltaic generation system under non-uniform insolation by means of monitoring cells	99					X	X	X						X		X						X
24	2015	Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency	25	X	X			X	X	X	X			X				X	X	X				
25	2010	Modelling of Photovoltaic Module	121	X				X								X		X						
26	2016	MPPT of solar photovoltaic cell using perturb & observe and fuzzy logic controller algorithm for buck-boost DC-DC converter	11		X		X		X							X	X	X		X			X	
27	2017	New MPPT solar generation implemented with constant-voltage constant-current DC/DC converter	1				X	X	X					X			X							X
28	2013	Numerical analysis of incremental conductance with cyclic measurement of the mppt algorithm for pv power generation	1	X	X	X	X		X		X	X		X	X	X		X			X			
29	1997	Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions	197	X				X								X			X					X

DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIÓN OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
ÍTEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	citas	modelamiento del panel	comparación de algoritmos	modelamiento del convertidor de potencia	modelamiento del algoritmo	cantidad de energía entregada	maximizar energía producida	minimización de pérdidas por el tiempo de convergencia	elección del mejor método de rastreo	elección del convertidor de potencia	complejidad de implementación	precisión de MPPT	rendimiento del convertidor	respuesta a cambios ambientales	sistemas micro controlados	sistemas computacionales	sistemas compuestos	Perturbar y observar	Conductancia Incremental	redes neuronales	Fuzy Control	Otros
30	2002	Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices	281	X			X	X								X			X					
31	2016	Series Resistance Measurement of Solar PV Modules Using Mesh in Real Outdoor Condition	4	X			X		X							X		X						
32	2015	Simulation of Incremental Conductance MPPT based two phase interleaved boost converter using MATLAB/Simulink	14	X	X	X	X	X	X			X			X	X		X			X			
33	2017	Study of the behavior of the Incremental Conductance algorithm for MPPT	4			X	X							X		X	X				X			
34	2011	Study on characteristics of photovoltaic cells based on MATLAB simulation	24	X			X	X						X		X		X		X				
35	2016	The comparative study of Buck-boost, Cuk, Sepic and Zeta converters for maximum power point tracking photovoltaic using P&O method	23	X	X							X			X		X			X				
			CANTIDAD:	15	14	15	10	18	24	6	8	10	6	9	11	18	13	16	8	15	8	2	3	7

Tabla 8. Resumen de indicadores del estado del Arte.

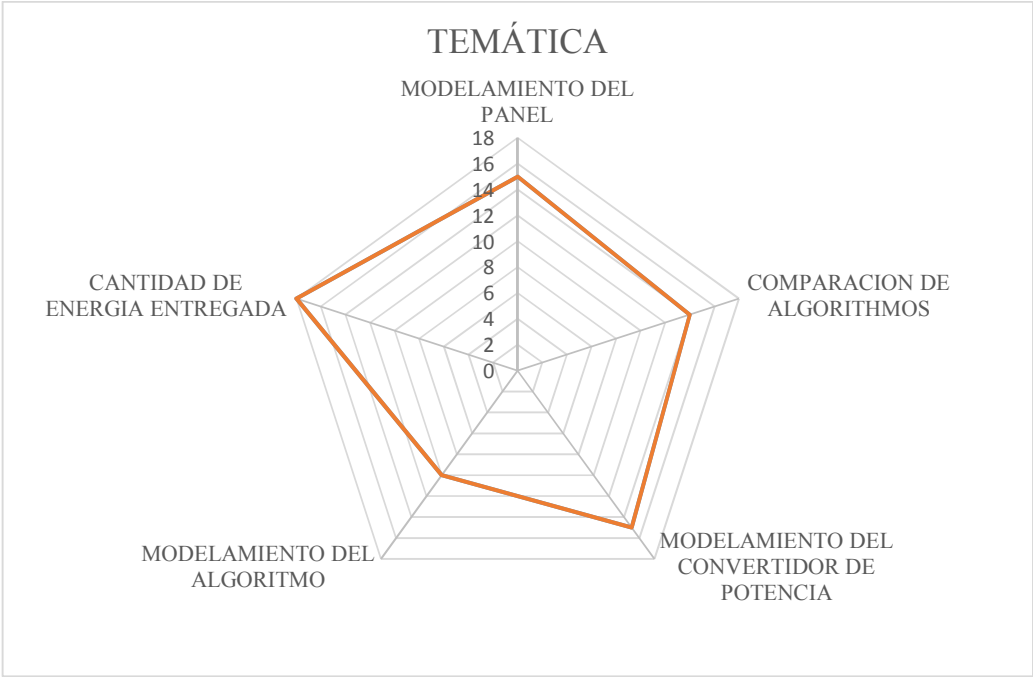


Tabla 9. Resumen para la formulación del problema.

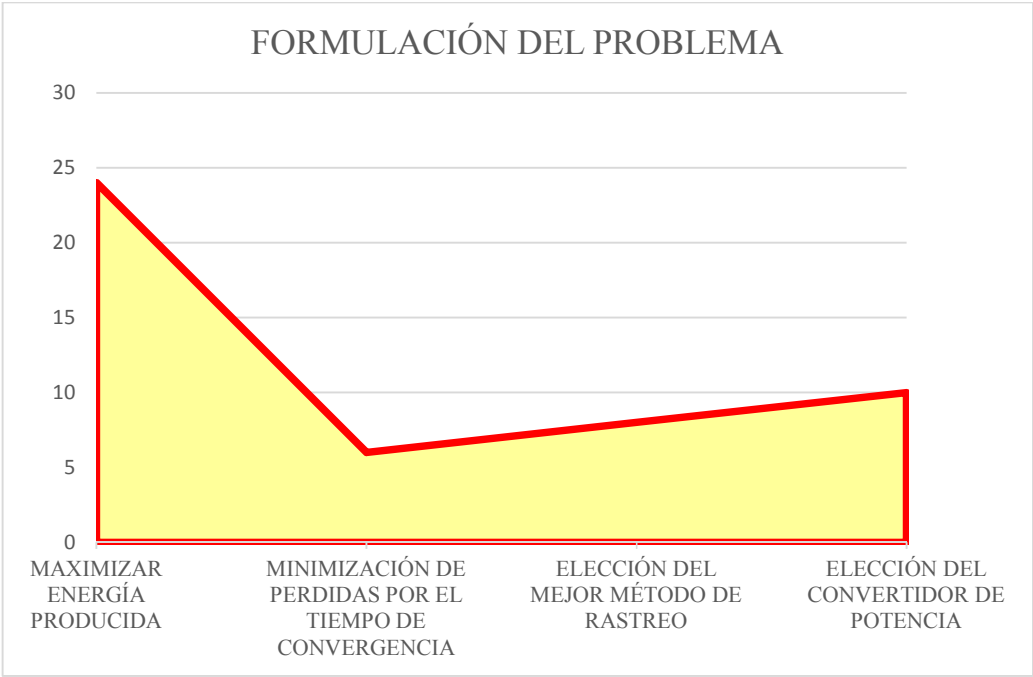


Tabla 10. Solución para el análisis del problema

